玉米秸秆全量深翻还田对高产田土壤结构的影响

于博；高聚林;胡树平;于晓芳；孙继颖;王志刚;高鑫;朱文新

(内蒙古农业大学　呼和浩特　010019)

摘　要: 为达到玉米生产 22 cm 耕层最适深度和 1.1~1.3 g·cm^{-3} 耕层最适土壤容重，解决内蒙古平原灌区耕层浅(16 cm)犁底层坚硬(容重 1.55~1.62 g·cm^{-3})且厚(45 cm)的农田土壤结构问题。采用连续 4 年的深翻秸秆还田的定位试验，秋收后玉米秸秆全量粉碎深翻还田，秸秆年均还田量为 20 034.97 kg·hm^{-2}，逐年形成深翻秸秆还田 1~4 年的 4 个试验处理 SF1-SF4 和不深翻秸秆还田的 1 个对照组 CK。结果 1，0~40 cm 土层，土壤容重 SF1-SF4 比 CK 显著减小 11.38%、12.28%、15.30%和 15.50%和土壤紧实度 SF1-SF4 比 CK 显著降低 1 136 kPa、1 063 kPa、1 136 kPa 和 1 155 kPa。结果 2, 0~20 cm 土层，$R_{0.25}$ 和 GWD, SF4 比 CK 显著减小 13.79%和 27.21%; MWD, SF3 和 SF4 比 CK 显著减小 8.25%和 19.59%; PAD, SF1 比 CK 显著降低 9.56%; SWA, SF1 比 CK 显著减小 9.56%; 团聚体分形维数 D 值, SF4 比 CK 显著增加 7.30%。结果 3, 20~40 cm 土层，$R_{0.25}$, SF1 和 SF2 比 CK 显著增加 13.69%和 17.83%; MWD 和 GWD, SF2 比 CK 显著增大 23.92%和 53.38%; *PAD*, SF1~SF4 比 CK 显著降低 9.20%, 3.02%, 8.38%和 3.16%; *SWA*, SF1~SF4 比 CK 显著增加了 13.58%, 16.49%, 22.67%和 25.42%; 团聚体分形维数 D 值, SF2 比 CK 显著降低 7.39%。结果 4，土壤有机质 SF1-SF4 比 CK 显著增加了 16.32%、24.78%、25.07%和 25.56%; 速效氮 SF1~SF4 比 CK 显著增加了 16.86%、14.46%、17.20%和 21.95%; 速效磷 SF1-SF4 比 CK 显著增加了 6.8%、12.07%、17.85%和 23.30%; 速效钾 SF1-SF4 比 CK 显著增加了 17.59%、16.34%、20.49%和 29.85%; 土壤 pH SF3、SF4 比 CK 显著降低了 1.95%和 1.73%。深翻秸秆还田 1~4 年对土壤 0~40 cm 土层的土壤影响显著，由以上结果可知深翻秸秆还田 2 年适合土壤犁底层结构的改良；深翻秸秆还田 3 年和 4 年最适合土壤耕层结构的改良，在应用深翻秸秆还田措施耕作措施的同时，应注意深翻 40cm 2 年后降低耕翻深度为 30 cm，原因是继续深翻 40 cm 会提高犁底层土壤团聚体破坏率和水稳性团聚体的不稳定系数，加剧犁底层土壤结构的破坏；而耕翻深度降低至 20 cm，继续保持对耕层土壤深翻秸秆还田，会促进秸秆的腐解，增加土壤有机质，土壤团聚体破坏率会降低，土壤水稳性团聚体的不稳定系数降低，有利于培肥耕层土壤。

关键词: 春玉米；深翻；秸秆还田；团聚体破坏率；水稳性团聚体不稳定系数；分形维数

中图分类号: S513　　　文献标志码: A

Effects of Deep Tillage and Straw Returning on Spring Maize Field of Soil Structure*

YU Bo, GAO Julin**, HU Shuping, YU Xiaofang, SUN Jiying, WANG Zhigang, GAO Xin, ZHU Wenxin

(Inner Mongolia Agriculture University, Hohhot 010019)

Abstract: To achieve the optimum tillage depth of 22cm and soil bulk density of 1.1~1.3 g·cm^{-3} of topsoil layer for maize production, and solve the farmland soil structure issue of shallow topsoil layer (16cm), hard (bulk density 1.55~1.62 g·cm^{-3}) and thick (45 cm) plow pan in Inner Mongolia Plain irrigation. The study was conducted on the four-year location experiment of deep tillage maize straw manure after harvest, the annual average maize straw returned to soil was 20 034.79 kg·hm^{-2} and four experiment treatments (SF1-SF4) of deep tillage maize straw manure from one to four years and a control group (CK) of non-deepening straw were formed year by year. Result 1, it showed that in 0–40 cm layer soil, the average value of bulk density (SF1-SF4) was significantly reduced by 11.38%, 12.28%, 15.30% and 15.50% compared with CK, and the average value of soil compaction (SF1-SF4) was significantly decreased by 1 136 kPa, 1 063 kPa, 1 136 kPa and 1 155 kPa compared with CK. Result 2, it showed that in 0–20 cm layer, SF4 of more than 0.25mm aggregate content and geometric mean diameter was significantly reduced by 13.79% and 27.21% compared with CK; SF3 and SF4 of the mean weight diameter of aggregates was reduced by 8.25% and 19.59% compared with CK; SF1 of the damage rate of soil aggregates was significantly decreased by 9.56% compared with CK; SF1 of the sabotage water-stable aggregates was reduced by 9.56% compared with CK, SF4 of the fractal dimension of aggregates was significantly increased by 7.30% compared with CK. Result 3, it showed that in 20~40 cm layer, SF1 and SF2 of more than 0.25 mm aggregate content was significantly increased by 13.69% and 17.83% compared with CK; SF2 of the mean weight diameter and geometric mean diameter of aggregates was significantly increased by 23.92% and 53.38% compared with CK; SF1~SF4 of the damage rate of soil aggregates was significantly decreased by 9.20%, 3.02%, 8.38% and 3.16% compared with CK; SF1-SF4 of the sabotage water-stable aggregates was significantly increased by 13.58%, 16.49%, 22.67% and 25.42% compared with CK, SF2 of the fractal dimension of aggregates was significantly decreased by 7.39% compared with CK. Result 4, it showed that SF1~SF4 of the soil organic matter was

significantly increased by 16.32%, 24.78%, 25.07% and 25.56% compared with CK; SF1-SF4 of the available nitrogen was significantly increased by 16.86%, 14.46%, 17.20% and 21.95% compared with CK; SF1~SF4 of the available phosphorus was significantly increased by 6.8%, 12.07%, 17.85% and 23.30% compared with CK; SF1~SF4 of the available potassium was significantly increased by 17.59%, 16.34%, 20.49% and 29.85% compared with CK; SF3 and SF4 of the soil pH was significantly decreased by 1.95% and 1.73%. There was a significant effect of deep tillage maize straw manure from one to four years on the soil structure of 0−40 cm soil layer. 2-year deep tillage maize straw manure was most suitable for improving the structure of soil plow pan; 3-year and 4-year deep tillage maize straw manure were most suitable for improving the structure of topsoil layer. In the application of deep tillage maize straw manure, it should be noted that the depth of plowing was 40cm, which should be reduced by 30 cm two years later. The reason was that the damage rate of soil aggregates of plow pan and the sabotage water-stable aggregatess were increased by the continuous 40cm deepening and the damage of soil plow pan structure was aggravated; the depth of plowing was reduced by 20cm, which maintained deep tillage maize straw manure on topsoil layer, the decomposition of straw and soil organic matter were increased, the damage rate of soil aggregates was decreased, and the sabotage water-stable aggregatess was decreased, which was conducive to cultivating topsoil layer.

Keywords: spring maize; high yield; deep tillage; percentage of aggregate disruption; sabotage water-stable aggregates; fractal dimension

土壤团聚体的形成与分布变化及其稳定性是土壤结构研究的主要内容[1]。土壤团聚体的含量和粒径大小直接影响作物生长发育[2,3]。土壤团聚体通过对土壤水、气、温度和机械性质影响间接影响作物产量[4,5]。不同耕作方式通过各种机具直接改变了耕作层土壤土粒空间形态分布[6]，从而改变耕作层土壤容重、孔隙、紧实度和团粒结构等土壤物理结构[7]。深翻秸秆还田通过影响微生物活性，促进腐殖质的形成，进而增强土壤结构的稳定性。国内学者针对秸秆还田的改土培肥做了大量研究，认为施用秸秆可使土壤机械强度的破裂系数降低[8]，土壤结构系数增加，特征团聚体组成比例明显下降，具有明显的改土作用[9]。秸秆还田对土壤物理结构的改善具有积极作用，特别是土壤容重变轻，破碎系数变小，使土壤疏松，通透性改善；秸秆还田后土壤大团聚体(>0.25 mm)数量增加，小团聚体(<0.25 mm)数量减少，土壤有机质增加，其胶结和团聚的作用增大，使土壤中的细小颗粒缔结成较大的团聚体，进而使土壤结构得到改善。刘巽浩等[10]研究指出：秸秆还田腐解过程中，促进了土壤颗粒的团聚作用，改良土壤结构，改善了通气与水分的渗透性和保水能力。高明等[11]研究也表明：不同稻草还田量，可使土壤中 1~0.25 mm 团聚体含量增加，而细团粒(<0.01 mm)含量减少，证实稻草还田能促进土壤的团聚体的团聚和提高土壤结构的稳定性。国外学者就玉米秸秆还田对土壤结构的影响做了较多的研究，认为秸秆还田可促进土壤微团粒(<0.25 mm)的团聚作用，显著改善土壤结构状况，增加土壤孔隙度，降低了土壤容重[12-14]。本研究总结了深翻秸秆还田对土壤结构影响的基础上，明确了土壤各级团聚体在土壤结构和土壤培肥的贡献作用[15-17]。土壤的结构状况的优劣决定土壤肥力的高低，而土壤结构的优劣又与土壤团粒结构的大小和性质成呈相关[18]。本研究设计了 5 年深翻秸秆还田定位试验，分层研究了土壤的物理性质、结构性和基础土壤肥力及 pH 值，旨在解决内蒙古平原灌区玉米生产耕层浅(16 cm)、犁底层坚硬(紧实度为 2 808 kPa、容重 1.55~1.68 $g\cdot cm^{-3}$)的土壤结构问题。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于内蒙古农业大学科技示范园区(内蒙古包头市土默特右旗沟门镇)试验基地(属土默川平原灌区)进行。土壤样品采集定点试验田 0~40 cm 土层土壤。地势平坦，定点试验田的耕层 15~17 cm，犁底层为 17~40 cm，土壤类型为沙壤土，土壤有机质含量为 8.15 $g\cdot kg^{-1}$，速效氮 68.35 $mg\cdot kg^{-1}$，速效磷 36.26 $mg\cdot kg^{-1}$，速效钾含量 165.05 $mg\cdot kg^{-1}$，pH 为 8.05，春玉米生育期降水 314 mm，生育期积温(5 月 1 日~9 月 23 日)2 580 ℃。

1.2 试验设计

定位试验于 2010 年 10 月至 2013 年 10 月秋季收获后进行，深翻深度 40 cm，玉米秸秆在联合收割机收获后全量粉碎还田。自 2010 年起逐年形成深翻秸秆还田 1~4 年四个试验处理(SF1~SF4)，秸秆年均还田量为 19 392.48 $kg\cdot hm^{-2}$、19 718.64 $kg\cdot hm^{-2}$、20 994.48 $kg\cdot hm^{-2}$、22 338.18 $kg\cdot hm^{-2}$；以不深翻秸秆还田作为对照(CK)，秸秆年均还田量为 17 730.18 $kg\cdot hm^{-2}$，共计 5 条试验地，每条试验地长 116.5 m，宽 4.5 m，秸秆还田量按照 1.0:1.2 的籽粒-秸秆比计算。玉米品种为‘郑单 958’，密度 82 500 株$\cdot hm^{-2}$，施肥量：纯 N 465 $kg\cdot hm^{-2}$、P_2O_5 210 $kg\cdot hm^{-2}$、K_2O 202.5 $kg\cdot hm^{-2}$，施肥方式：磷钾肥全部作基肥，氮肥以 3∶6∶1 分别用作

基肥和追肥，追肥于拔节期与灌浆前施用，灌水 4 次：拔节期 1 次、大喇叭口期 1 次和灌浆期 2 次，详见表 1。深翻秸秆还田后各处理产量构成，如表 2 所示，以含水量 14%的重量折算各处理产量。

表 1　深翻秸秆还田试验设计方案

Table 1　Test design scheme of deep tillage and straw returning

处理 Treatment	耕翻深度 Ploughing depth	秋深翻处理年(a) Autumn subsoiling time(a)
CK	旋耕 15 cm Rotary tillage 15 cm	0
SF1	深翻 40 cm Subsoiling 40 cm	2013
SF2		2012、2013
SF3		2011、2012、2013
SF4		2010、2011、2012、2013

表 2　深翻秸秆还田对春玉米产量结构的影响

Table 2　Effects of deep tillage and straw returning on spring maize yield components

处理 Treatment	亩穗数 Spike numbers	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	产量 Yield (kg·hm^{-2})
CK	5 187.33±41.03a	709.33±14.11a	314.90±3.44a	14 776.50±420.30a
SF1	5 084.33±26.56a	723.33±72.73a	344.20±2.68b	16 160.40±610.70a
SF2	5 229.67±90.80a	693.33±60.58a	346.57±1.14b	16 432.20±564.75a
SF3	5 241.00±70.06b	720.67±17.01a	354.77±1.84c	17 495.40±304.20b
SF4	5 428.00±28.88b	707.20±15.65a	363.43±4.06bc	18 615.15±386.55c

1.3　试验方法

1.3.1　采样方法

于 2010 年 10 月 18 日收获期，2011 年 4 月 27 日春播前、8 月 16 日灌浆期、10 月 19 日收获期，2012 年 4 月 24 日春播前、8 月 16 日灌浆期和 10 月 18 日收获期, 2013 年 4 月 26 日春播前、8 月 19 日灌浆期和 10 月 25 日收获期, 2014 年 4 月 18 日春播前、8 月 16 日灌浆期，按“△”形 3 点取土法在 0~20 和 20~40 cm 2 个土层采集原状土样，采用 PVC 管(内径 160 mm)采集原状土，将原状土壤放于阴凉处风干后除去秸秆及小石块等杂物，将大土块按照自然裂痕剥离 1 cm^3，取 500 g，采用萨维诺夫法[15]筛分土壤样本，待用室内分析。

1.3.2　测定方法

土壤容重(Soil Bulk Density, SBD)采用环刀法测定，测定深度为 0~40 cm 逐层取土样测其土壤中土壤容重，每个点重复 3 次，于春玉米播种前，灌浆期和籽粒收获期测定。

土壤坚实度(*Soil Rigidity*, *SR*)采用坚实度仪进行测定。测定深度为 0~40 cm，逐层取土样测其紧实度，每个点重复 3 次，于春玉米播种前，灌浆期和籽粒收获期测定。

机械稳定性团聚体(萨维诺夫法[15])：用震荡式机械筛分仪进行测定, 3 次重复。水稳性团聚体(萨维诺夫法[15])：用团粒分析仪进行测定, 3 次重复。

测定土壤速效 N、P、K 含量和有机质含量。速效氮测定采用碱解扩散法；速效磷测定采用碳酸氢钠浸提分光光度计比色法；速效钾测定采用火焰光度计法；有机质测定采用重铬酸钾容量法。

1.3.3　计算方法

利用各粒级团聚体数据，计算>0.25 mm 团聚体 $R_{0.25}$、团粒平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)、团粒几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GWD)、土壤团聚体破坏率(Percentage of Aggregate

Disruption, PAD)、不稳定团粒指数(Sabotage Water-stable Aggregates, SWA)和团聚体分形维数(D)[16]。

$$R_{0.25}=\frac{M_{r>0.25}}{M_t}=1-\frac{M_{r<0.25}}{M_t} \qquad (1)$$

(1)式中, $R_{0.25}$为直径大于 0. 25 mm 团聚体的含量, Mt 为团聚体的总质量, $Mr_{>0.25}$ 为粒径>0.25 mm 团聚体的质量(g), $Mr_{<0.25}$ 为粒径<0.25 mm 团聚体的质量(g)。

$$MWD=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i w_i)}{\sum_{i=1}^{n}(w_i)} \qquad (2)$$

(2)式中, MWD 为团粒平均重量直径(mm), x_i为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm); w_i为对应于x_i的团聚体百分含量(%)。

$$GMD=Exp\left[\frac{\sum_{i=1}^{n} w_i \ln \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^{n} w_i}\right] \qquad (3)$$

(3)式中, GMD 为团粒几何平均直径(mm), x_i为任一级别范围内团聚体的平均直径(mm); w_i为对应于x_i的团聚体百分含量(%)。

$$PAD=\frac{R_{D0.25}-R_{S0.25}}{R_{D0.25}}\times 100\% \qquad (4)$$

(4)式中, PAD 为团聚体破坏率(%), $R_{D0.25}$为>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%), $R_{S0.25}$为>0.25 mm 水稳性团聚体含量(%)。

$$SWA=\frac{M_{sr>0.25}}{M_{st}}\times 100\% \qquad (5)$$

(5)式中, *SWA* 为不稳定团粒指数(%), M_{st}为供试土壤总重量, $M_{sr>0.25}$为水稳性团聚体重量。

$$\frac{M_{r<x_i}}{M_t}=\left[\frac{x_i}{x_{max}}\right]^{3-D} \qquad (6)$$

(6)式为杨培岭[21]推导团聚体分形维数(D)公式, D 为分形维数, x_i为某级团聚体平均直径; $M_{r<xi}$为粒径小于x_i的团聚体的重量; M_t为团聚体总重量; x_{max}为团聚体的最大粒径。

1.3.4 数据处理

采用 Excel 2007 进行数据处理、绘制图表, SPSS 13.0 统计分析软件进行单因素方差(One-Way ANOVA)分析和相关性分析, 不同处理之间多重比较采用 Tukey's 法, 然后经过 t 检验(P=0.05)。

2 结果与分析

2.1 深翻秸秆还田对土壤容重的影响

春玉米播种前、灌浆期和收获后, 测定土壤 0~20cm 土层土壤的容重, 如图 1 所示, 春播前 SF1~SF4 比 CK 土壤容重显著降低 7.63%, 9.72%, 15.27%, 14.58%。灌浆期, SF1~SF4 的比 CK 显著降低 14.56%, 16.56,%, 16.56%和 18.54%(P<0.05), SF1~F4 间变化差异不显著。收获期, SF1~SF4 比 CK 土壤容重显著降低 11.97%, 10.56%, 14.08%和 13.38%(P<0.05)。

20~40 cm 土层土壤的容重, 如图 2 所示, 春播前, SF1~SF4 比 CK 显著降低了 8.86%、15.19%、17.72%和 14.56%(P<0.05)。灌浆期, SF1~SF4 比 CK 显著降低了 12.82%、12.86%、12.17%和 12.18%(P<0.05); SF1~F4

间变化差异不显著。收获期，SF1~SF4 比 CK 显著降低了 12.19%、12.21%、14.74%和 12.17%(P<0.05)；SF1~SF4 间变化差异不显著，结果显示：深翻秸秆还田措施能够显著降低 0~40 cm 土层土壤容重。

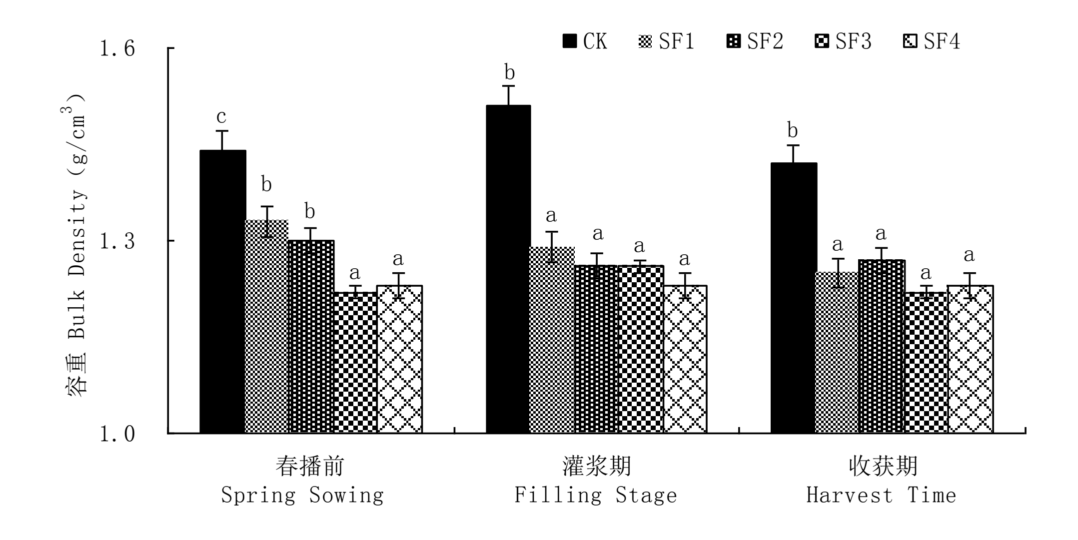


图 1　深翻秸秆还田对不同时期 0~20 cm 土层容重的影响

Fig. 1　Effects of deep tillage and straw returning on bulk density in 0–20 cm soil layer at different time

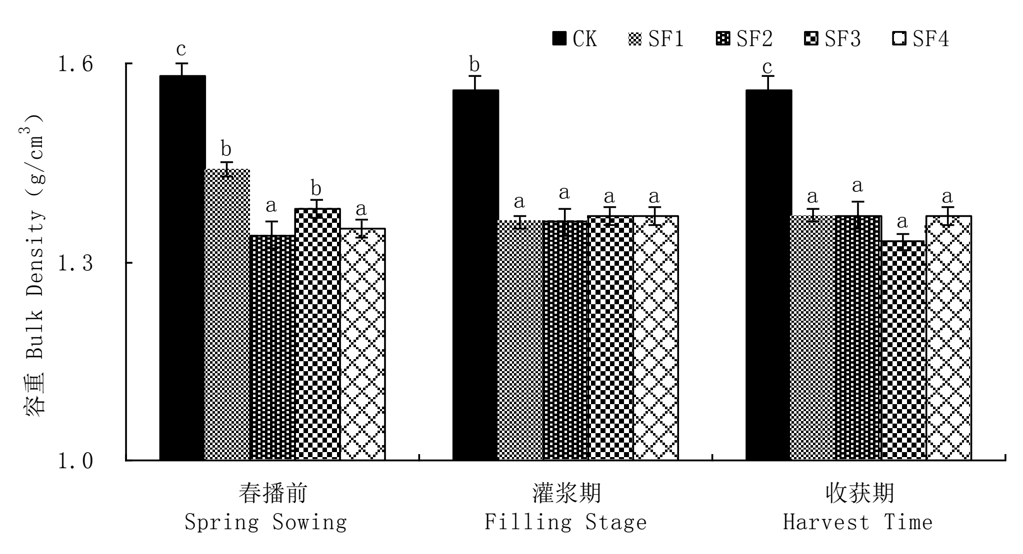


图 2　深翻秸秆还田对不同时期 20~40 cm 土层容重的影响

Fig. 2　Effects of deep tillage and straw returning on bulk density in 20–40 cm soil layer at different time

2.2　深翻秸秆还田对土壤紧实度的影响

如图 3、图 4、图 5 所示，玉米春播前、灌浆期和收获后，土壤紧实度 SF1~SF4 显著小于 CK, CK 在 10 cm 土层处存在坚硬的犁底层，土壤紧实度 2 375 kPa 且厚度为 30 cm，深翻秸秆还田 1~4 年后降低到 163 kPa、93 kPa、93 kPa 和 70 kPa。结果说明，深翻耕作措施改变土壤结构，疏松耕层和犁底层土壤，显著降低土壤紧实度，深翻达到耕作土壤的目的。

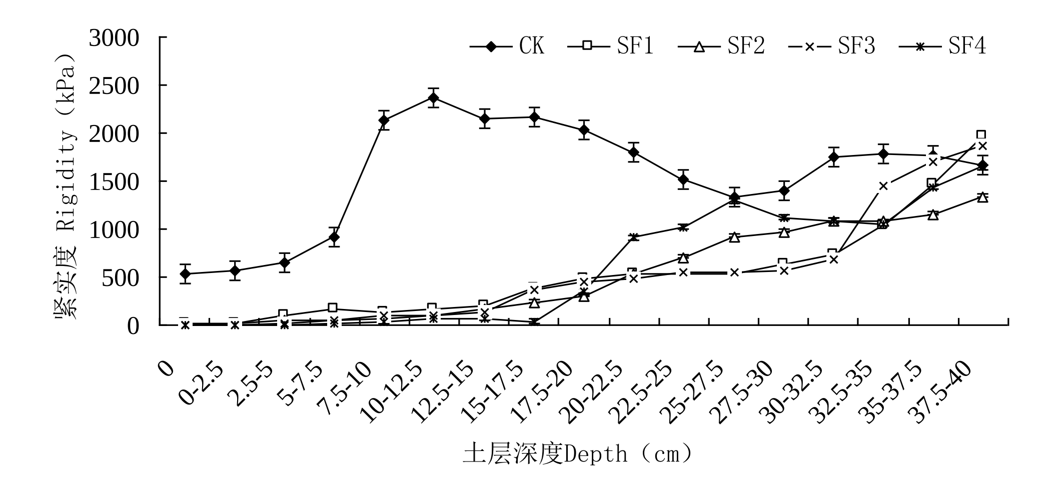


图 3　深翻秸秆还田对春播前 0~40 cm 土壤紧实度的影响

Fig. 3　Effects of deep tillage and straw returning on rigidity in 0-40cm soil layer before spring sowing

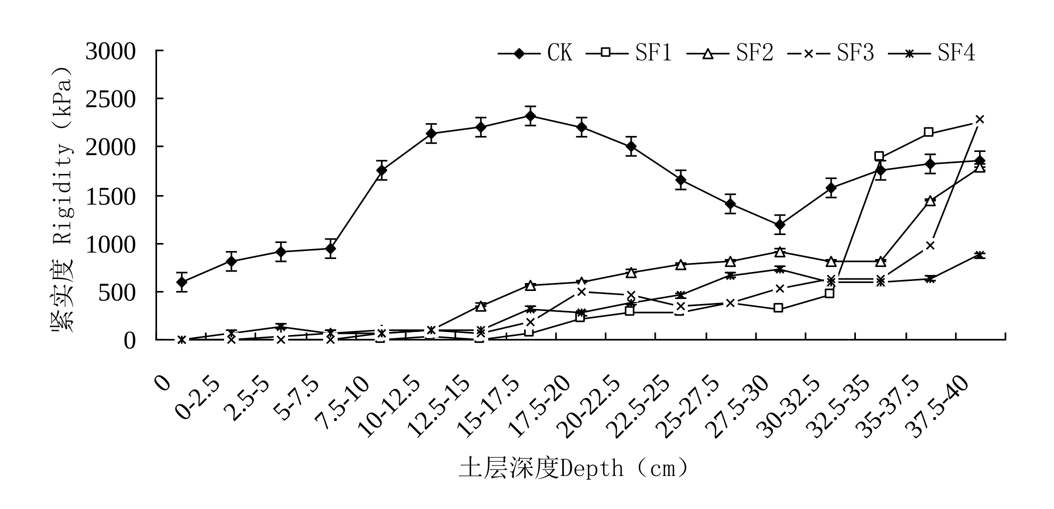


图 4　深翻秸秆还田对灌浆期 0~40 cm 土壤紧实度的影响

Fig. 4　Effects of deep tillage and straw returning on rigidity in 0–40 cm soil layer at filling stage

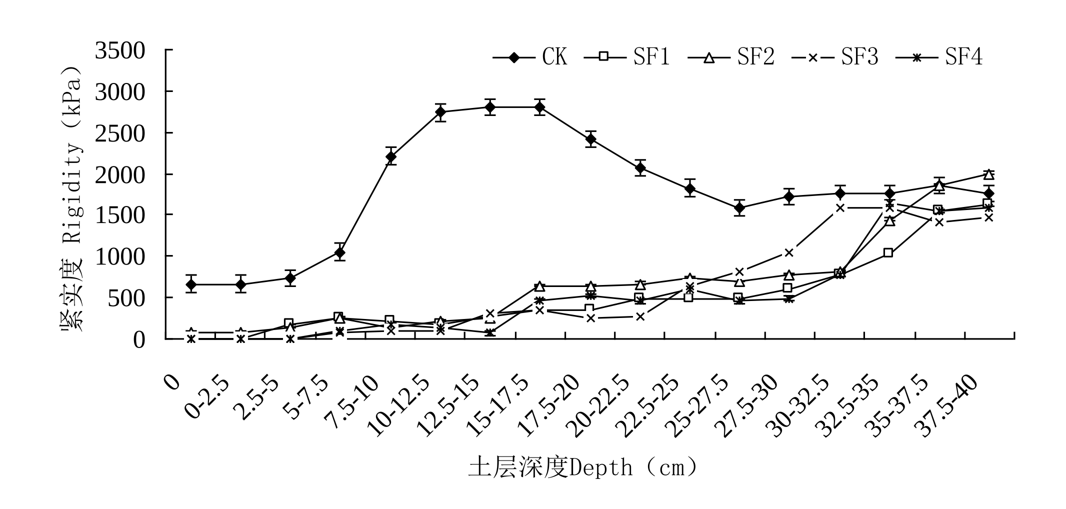


图 5　春播前深翻秸秆还田对籽粒收获后期土壤紧实度的影响

Fig. 5 Effects of deep tillage and straw returning on rigidity in 0–40 cm soil layer after harvest time

2.3 深翻秸秆还田对土壤团聚体的影响

如表 3 所示，0~20cm 土层机械团聚体的相对含量 $R_{0.25}$, SF1~SF4 比 CK 显著降低 2.83%, 0.62%, 0.62%, 13.79%(P<0.05)。各处理间，SF1~SF3 显著小于 SF4, SF1~SF3 之间变化差异不显著。20~40 cm 土层, SF1 和 SF2 比 CK 显著增加 13.69%, 17.83%, SF3 和 SF4 分别比 CK 增加 4.26%和 5.68%。各处理间, SF4 显著大于 SF3, SF3 显著大于 SF2 和 SF1, SF1 和 SF2 之间无差异。

表 3 深翻秸秆还田对团聚体特征的影响

Table 3 Effects of deep tillage and straw returning on characteristics of soil aggregates

土层深度(cm) Depth (cm)	处理 Treatment	$R_{0.25}$	MWD	GMD
0-20	CK	0.812±0.01a	2.91±0.05a	1.47±0.04a
	SF1	0.789±0.02a	3.04±0.04a	1.50±0.03a
	SF2	0.807±0.03a	2.97±0.09a	1.49±0.09a
	SF3	0.808±0.02a	2.67±0.08b	1.34±0.06a
	SF4	0.700±0.02b	2.34±0.05c	1.07±0.03b
20-40	CK	0.774±0.02a	3.01±0.16a	1.48±0.10a
	SF1	0.880±0.03b	3.20±0.15a	1.80±0.16ab
	SF2	0.912±0.03c	3.73±0.10b	2.27±0.14b
	SF3	0.807±0.01ab	2.91±0.03a	1.45±0.02a
	SF4	0.818±0.01ab	2.75±0.01a	1.41±0.01a

由表 3 可知，0~20cm 土层团聚体平均重量直径 MWD，SF1 和 SF2 比 CK 增加 4.47%和 2.06%；SF3 和 SF4 比 CK 显著减小 8.59%和 18.90%；各处理间, SF4 显著小于 SF3, SF3 显著小于 SF2 和 SF1, SF1 与 SF2 无差异。团聚体几何平均直径 GMD，SF4 比 CK 显著降低 27.21%，其他变化差异不显著。20~40 cm 土层团聚体平均重量直径 MWD 与几何平均直径 GMD 呈正相关。平均重量直径 MWD，SF2 比 CK 显著增大 23.92%, SF1、SF3 和 SF4 比 CK 变化不显著；各处理间, SF2 显著大于 SF1、SF3 和 SF4, SF1、SF3 和 SF4 之间差异不显著。团聚体的几何平均直径 GMD, SF2 比 CK 显著增大 53.38%, SF1、SF3 和 SF4 比 CK 变化不显著；各处理间, SF2 显著大于 SF1, SF1 显著大于 SF3 和 SF4, SF3 和 SF4 间无差异。

以上结果说明团聚体特征参数的变化是由于深翻秸秆还田后秸秆腐解增加土壤有机质，进而增加土壤有机碳，促进了土壤的吸附作用，增加土壤团聚体的团聚，但是秸秆当季腐解的速率较慢，导致深翻 1~2 年的土壤团聚体的团聚速度小于深翻破坏的土壤团聚体，深翻秸秆还田 1~2 年土壤团聚体的破坏率显著增大，秸秆还田 3~4 年后，土壤有机质逐渐积累，土壤团聚体团聚速率大于深翻破坏的土壤团聚体，促进了土壤团聚体的团聚。

2.4 深翻秸秆还田对土壤团聚体稳定性的影响

如表 4 所示, 0~20 cm 土层，团聚体破坏率 PAD, SF1 比 CK 显著减小 9.56%, SF2~SF4 比 CK 降低 5.01%、2.19%和 5.94%；各处理间, SF1 显著低于 SF2~SF4, SF2~SF4 之间变无差异。20~40 cm 土层, SF1~SF4 比 CK 显著降低 9.20%、3.02%、8.38%和 3.16%；各处理间, SF1 和 SF3 显著低于 SF2, SF1、SF2 和 SF4 间无差异。

表 4 深翻秸秆还田对 0~40 cm 团聚体破坏率(PAD)的影响

Table 4 Effects of deep tillage and straw returning on PAD in 0–40 cm soil layer

深翻年次 Subsoiling frequency	0~20 cm	20~40 cm
CK	80.85±0.26a	78.47±0.96a
SF1	74.02±0.74b	71.25±0.86c
SF2	77.75±0.51ab	76.10±0.29b
SF3	80.06±0.40a	71.89±0.22c
SF4	76.99±2.47ab	75.99±0.34bc

注: 1.2.3.4 表示秋深翻年次; CK 表示秋深翻 0 年次

如图 6 所示, 0~40 cm 土层水稳性团聚体不稳定系数 SWA 进行回归分析。0~20 cm 土层 SF1~SF4 比 CK 显著降低了 6.52%、8.56%、13.44%和 18.37%; 各处理间，SF1~SF4 呈逐渐降低趋势，与一次函数 $y=-0.008\,5x+18.137$ 拟合，相关系数 $R^2=0.775$。20~40 cm 土层 SF1~SF4 比 CK 显著增加了 13.58%、16.49%、22.67%和 25.42%; 各处理间，SF1~SF4 呈逐渐升高趋势，与一次函数 $y=0.2498x+18.744$ 拟合，相关系数 $R^2=0.6046$。非常值得注意的是，深翻秸秆还田措施对 20~40 cm 土层土壤水稳性团聚体稳定性破坏显著。

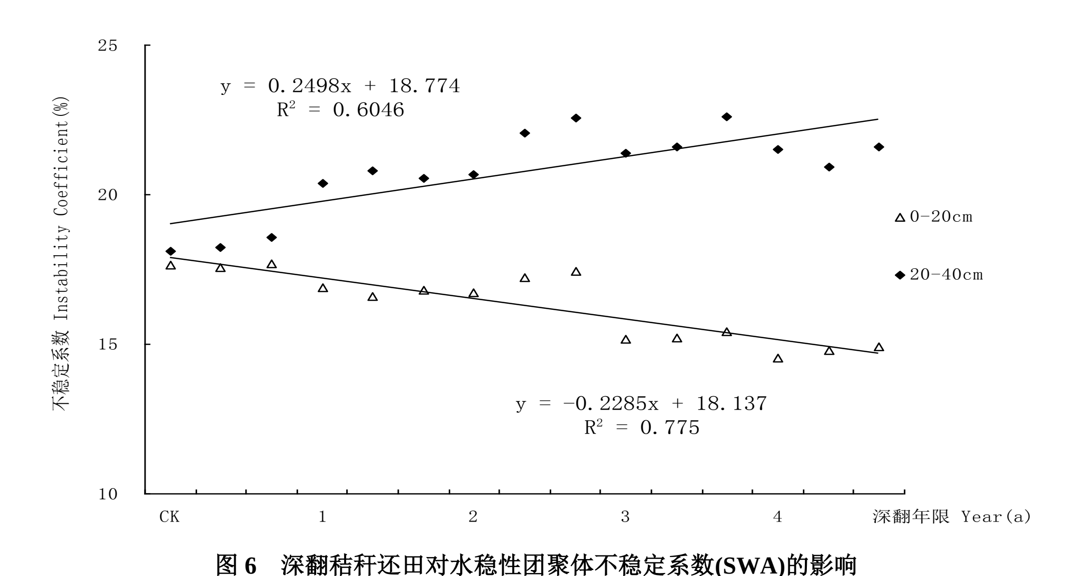


图 6 深翻秸秆还田对水稳性团聚体不稳定系数(SWA)的影响

Fig. 6 Effects of deep tillage and straw returning on SWA in 0–40 cm soil layer

2.5 深翻秸秆还田对土壤团聚体分维特征的影响

如图 7 所示, 0~20 cm 土层土壤团聚体的分形维数 D, SF4 比 CK 显著增大 7.30%, SF1~SF3 与 CK 之间无差异; SF1~SF4 间，与二次函数 $y=0.002\,6x^2-0.028\,2x+2.371\,1$ 拟合，相关系数 $R^2=0.731\,8$。20~40 cm 土层，SF2 比 CK 显著降低 7.39%，SF1~SF4 间，与二次函数 $y=0.002\,4x^2-0.029\,6x+2.310\,1$ 拟合，相关系数 $R^2=0.629\,1$。

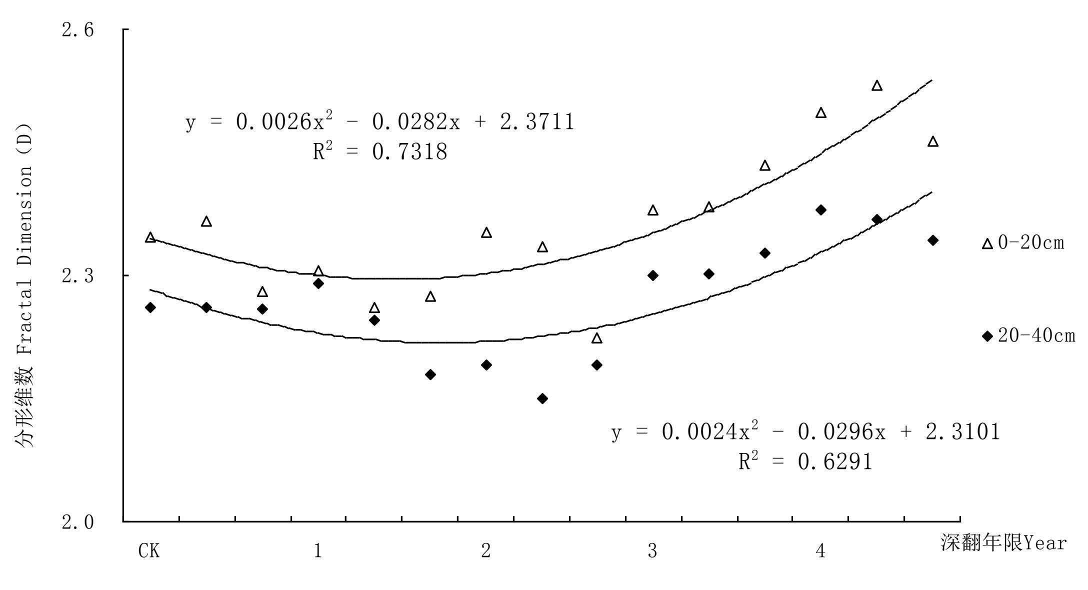


图 7 深翻秸秆还田对 0-40cm 土层团聚体分形维数 D 的影响

Fig. 7 Effects of deep tillage and straw returning on D value in 0–40 cm soil layer

2.6 深翻秸秆还田对土壤基础肥力和 pH 值的影响

如表 5 所示，深翻秸秆还田对土壤有机质影响，SF1~SF4 比 CK 显著增加了 16.32%、24.78%、25.07%和 25.56%，深翻秸秆还田各处理间 SF4>SF3>SF2>SF1。土壤速效养分，速效氮，SF1~SF4 比 CK 显著增加

了 16.86%、14.46%、17.20%和 21.95%；各处理间 SF4>SF3>SF2>SF1。速效磷，SF1~SF4 比 CK 显著增加了 6.8%、12.07%、17.85%和 23.30%；各处理间 SF4>SF3>SF2>SF1。速效钾，SF1~SF4 比 CK 显著增加了 17.59%、16.34%、20.49%和 29.85%；各处理间 SF4>SF3>SF1>SF2。pH 值，SF3 和 SF4 比 CK 显著降低了 1.95%和 1.73%，各处理间，SF1>SF2>SF4>SF3。秸秆腐解还田后，秸秆中的木质素、纤维素和矿质营养元素还田到土壤中，增加土壤有机质和速效养分，秸秆还田具有培肥土壤的作用，但因为秸秆当季腐解的速率较低，适当配合施用氮肥，促进秸秆的腐解有利于恢复深翻破坏的土壤结构，秸秆还田 3~4 年后，可促进土壤团聚体团粒结构的形成，培肥土壤。

表 5　深翻秸秆还田对土壤有机质、速效养分和 pH 的影响

Table 5　Effects of deep tillage and straw returning on organic matter and available nutrients and pH

处理 Treatment	有机质 Organic matter (g·kg^{-1})	速效养分 Available nutrients (mg·kg^{-1})			pH
		速效氮 Available N	速效磷 Available P	速效钾 Available K	
CK	10.29±0.41a	48.61±1.06a	5.88±0.11a	50.81±0.91a	8.22±0.01a
SF1	11.87±0.34b	58.47±0.60b	6.28±0.08ab	59.75±0.05b	8.23±0.02a
SF2	12.84±0.17c	55.64±2.16b	6.59±0.23b	59.11±1.26b	8.13±0.02a
SF3	12.87±0.08c	56.97±4.51b	6.93±0.03bc	61.22±1.40b	8.06±0.04b
SF4	12.92±0.06c	59.28±0.84b	7.25±0.26c	65.98±2.46c	8.08±0.06b

同列不同小写字母表示不同处理间在 0.05 水平差异显著。Different lowercase letters in the same column mean significant difference among different treatments at 0.05 level.

3　讨论

多次深翻后 0-40cm 土层土壤混合，连续 2 年深翻，经过测算(直尺测量)0-20cm 土层的土壤被旋转犁翻入 10-30cm 的位置，下层的 35-40cm 处土壤逐年被旋转犁翻至土壤表层。每年春季春玉米播种前整地，使用旋耕机旋耕深度 10cm 进行整地，，平整土地，用时进行春汇，以备春播。秋深翻和春旋耕使 0-20cm 土层土壤结构被破坏，20-40cm 土层土壤因春季节旋耕未扰动，土壤结构比 0-20cm 土层相对稳定。深翻秸秆还田后，将 35-40cm 处土壤翻至土壤表层。依次类推，4 年后 0-20cm 土层处于 20-40cm 土层的位置。因试验条件所限，采用直尺测定，深翻后 0-20cm 土壤定位更好的方法是采用 C 同位素标记法，可准确定位 0-20cm 土层土壤 2-4 年后的位置。

连续 4 年深翻秸秆还田定位试验结果说明: 0~20cm 土层深翻可显著降低土壤容重，改良土壤结构。深翻秸秆还田 3 年后，土壤容重降低 0.20 g/cm^3。20~40cm 土层深翻 1 年显著降低了土壤容重，打破犁底层，深翻 4 年土壤容重显著降低 0.18 g/cm^3，这与马永良等[19]研究结果一致。

土壤形成坚硬犁底层的原因是机械压实、灌水和降雨等，耕层(0~20cm)土壤中的粘粒随水向下迁移，在下层土壤中沉积，造成下层土壤紧实度增大，形成新的犁底层；另外大型机械，包括运输的拖拉机和联合收割机的压实作用，对形成新的犁底层有一定的影响，深翻秸秆还田处理后土壤紧实度显著降低，打破犁底层利于玉米生育后期根系下扎，吸收深层土壤的养分和水分。

土壤结构方面，0~20cm 土层，深翻秸秆还田 4 年后，土壤团聚体破坏率显著升高，深翻秸秆还田处理在 4 年后增施氮肥，调节土壤的 C/N，加速秸秆腐解，腐殖质对土壤颗粒具有胶结作用，其中主要有阳离子桥、氢键、范德华力和二三价氧化物的聚合力，能够促进小团聚体胶结成大团聚体，但上述秸秆还田试验证实，秸秆还田 4 年后，对于土壤耕层的胶结作用小于分散作用，因此在生产中，应加速秸秆的腐解，促进腐殖质的团聚作用。20~40cm 土层，$R_{0.25}$，SF1 和 SF2 比 CK 显著加 13.69%和 17.38%，SF3 和 SF4 比 CK 变化差异不显著。因为深翻后耕层 0~20cm 土壤粘粒被翻到犁底层 20~40cm 处，犁底层土壤腐殖质的胶结作用形成大团聚体，促进团粒结构的形成。0~20cm 土层，平均重量直径 MWD，SF3 和 SF4 比 CK 显著减小 8.25%27.21%；几何平均直径 GMD，SF4 比 CK 显著减小 27.21%。20~40cm 土层，MWD 和 GMD，SF3 比 CK 显著增大 23.92%和 53.38%。0~20cm 土层水稳性团聚体不稳定系数，SF1~SF4 显著小于 CK，表明深翻秸秆还田措施有利于耕层水稳性团聚体的稳定性；20~40cm 土层 SF1~SF4 显著大于 CK，说明深翻秸秆还田措施

不利于犁底层水稳性团聚体的稳定性，破坏了犁底层土壤结构的稳定性。因此在秋深翻整地时，尤其要注重犁底层水稳性团聚体的破坏和不稳定性。以上结果说明秸秆还田处理虽然没有增加了团聚体数量但是有利于提高土壤结构体的稳定性，防止土壤退化，这与张鹏等[20]人的研究结果不完全一致。

分形维数作为一个评价土壤结构分布的新型综合指标，不仅描述了土壤颗粒的大小及分布，而且反映了土壤质地的均一程度，其值越高，表明土壤质地越黏重，通透性越差[21]。很多研究认为，团聚体分布具有分形特征[22]。本研究结果表明，深翻秸秆还田后，耕层土壤被翻入犁底层，分形维数 D 值耕层显著高于犁底层。逐年深翻秸秆还田后，分形维数逐渐增大。但 20~40cm 土层在深翻秸秆还田 2 年后，分形维数 D 值显著降低。说明深翻秸秆还田 2 年时对土壤 0~40cm 土层土壤结构破坏程度最大，造成这种现象的原因土壤中秸秆的腐解速度慢和冬季冻融交替等气候因素有关，导致粘粒数量增加有关。

4　结论

玉米秸秆全量深翻还田 2 年后，首先, 0-20cm 土层土壤容重显著降低 12.21%，土壤紧实度显著降低了 37.26%。第二，土壤结构参数 $R_{0.25}$, SF2 比 CK 显著增加了 17.83%，而其他处理相比 CK 增加程度未达到显著水平; *MWD*, SF2 比 CK 显著增加了显著增加了 23.92%和 53.38%，其他处理与 CK 相比变化程度均小于 SF2，同时 SF3 和 SF4 相比 CK 未达到显著水平。第三, 20-40cm 土层 *PAD* 和 *SWA* 各处理比 CK 显著增加，但是各处理间 SF2 与 SF1、 SF3 和 SF4 相比变化差异不显著。第四，团聚体分形维数是表征土壤质地层次的渐序变化，同时也表征土壤质地分类的差异性, SF2 比 CK 分形维数值显著降低了 7.39%，表明经过深翻秸秆还田 2 年处理后，土壤质地变轻，该措施对于 20-40cm 犁底层土壤的改良是有效的，有利于春玉米生育后期根系向犁底层生长，吸收利用深层的土壤中的养分和水分，同时 SF1、SF3 和 SF4 比 CK 变化差异不显著。综上，说明深翻秸秆还田 2 年可有效改良土壤犁底层的土壤结构，之后应继续深翻秸秆还田，长期改良土壤结构，培肥土壤。

玉米秸秆全量深翻还田后, 0-20cm 土层土壤容重显著降低 15.27%，各处理降幅最大，土壤紧实度由 1790kPa 显著降低至 132kPa，各处理中降幅最大。土壤结构参数 $R_{0.25}$, SF3 显著小于 CK，其他处理与 CK 相比变化差异不显著; *MWD*, SF3 和 SF4 显著小于 CK, *GMD*, SF3 显著小于 CK; *PAD*, SF3 显著小于 CK; *SWA*, SF3 比 CK 显著减小 13.44%。团聚体分形维数 D 值, SF3 比 CK 显著增大 7.30%。土壤养分方面，深翻秸秆还田 4 年后相比 1-2 年处理土壤有机质显著增加，土壤速效养分显著增多，土壤 pH 值显著减小。综合深翻秸秆还田 4 年处理的土壤物理、土壤结构和土壤养分变化结果均表明，耕层土壤容重减小、紧实度降低，土壤结构和质地有所改善，土壤养分显著增加，因此深翻秸秆还田措施适宜改良土壤结构， 4 年后应继续深翻秸秆全量还田，且长期应用深翻秸秆还田措施改良土壤，同时适当降低耕翻深度至 30cm 为宜。

通过以上结论，针对长期的小动力农机耕作和有机肥投入不足、化肥不合理施用，使玉米主产区普遍存在耕层浅、犁底层坚硬、土壤通透性差、蓄水保肥能力偏低的问题，秸秆全量深翻还田可显著降低土壤耕层和犁底层的容重和紧实度，打破犁底层坚硬的土壤结构，同时显著增加了土壤有机质，降低土壤 pH 值，培肥土壤。因此，玉米秸秆全量深翻还田对内蒙古平原灌区玉米高产田耕层和犁底层土壤的改良是一项利于生态农业发展可持续的耕作措施。

参考文献 References

[1] Bronick C J,Lal R.Soil structure and management:a review[J].Geoderma,2005,124:3-22.

[2] 周虎,吕贻忠,李保国.土壤结构定量化研究进展[J].土壤学报,2009,46(3): 501-506.

Zhou H, Lü Y Z,Li B G.Advancement in the study on quantification of soil structure[J].Acta Pedologica Sinica,2009, 46(3): 501-506.

[3] Madari B,Machado P L O A,Torres E,de Andrade A G,Valencia L I O.No tillage and crop rotation effects on soil aggregation and organic carbon in a Rhodic Ferralsol from southern Brazil[J].Soil and Tillage Research,2005, 80: 185-200.

[4] Laity J. Relationship between soil physical properties and crop production[J].Adv. Soil Sci, 1985, 1:277~294.

[5] Spouse P J, Gerick T J, Russell W B, et al. Spatial distribution of soil particle size and aggregate stability index in a clay soil[J].Soil Sci.,1990,149(6):351~360.

[6] 丁启朔.耕作力学研究的土壤结构及其评价方法[D].南京:南京农业大学, 2006: 1-5.

Ding Q S. Soil structure and its assessment for soil tillage research[D].Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2006: 1-5.

[7] 侯贤清,贾志宽,韩清芳,孙红霞,王维,聂俊峰,杨宝平.不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J].农业工程学报, 2012, 28(5): 85-94.

Hou X Q, Jia Z K, Han Q F, Sun H X, Wang W, Nie J F, Yang B P. Effects of different otational tillage patterns on soil structure, infiltration and water

storage characteristics in dry land[J].Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(5): 85-94.

[9] 朱红霞,姚贤良.有机物料在稻作制中的物理作用[J].土壤学报,1993,30(2):137 -145.

Zhu H X,Yao Z L. Physical effect of organic material on rice-based cropping system[J]. Acta Pedologica Sinica, 1993,30(2):137 -145.

[9] Dou S, Tan S W, Xu X C, et al. Effect of organic manure application on physical properties and humus characteristics of paddy soil[J].Pedro-sphere,1994,2:211-219.

[10] 刘巽浩,王爱玲,高旺盛.实行作物秸秆还田促进农业可持续发展[J].作物杂志,1998(5):2-6.

Liu X H,Wang A L,Gao W S. The crop straw returned to promote agricultural sustainable development[J].Crops,1998(5):2-6.

[11] 高明,魏朝富,陈世正.稻草还田对土壤性质及水稻产量的影响[J].西南农业大学学报,1995,17(5):430-439.

Gao M,Wei C F,Cheng S Z.Effects of straw returning on soil properties and the rice yield[J].Journal of Southwest University ,1995,17(5):430-439.

[12] Rodman A,Caravaca F,Hernandez M T,et al. No-tillage,cropresidue additions, and legume cover cropping effects on soil quality characteristics under maize in Particular watershed(Mexico)[J].Soil and Tillage Research,2003,72(1):65-73.

[13] Bescansa P,Imazi M J,Virto I, et al. Soil water retention as affected by tillage and residue management in semiarid Spain[J].Soil and Tillage Research,2006,87(1):19-27.

[14] Sasal M C,Andriulo A E,Aboada M A.Soil porosity charac-teristics and water movement under zero tillage insilty soils inrgentinian Pampas[J].*Soil and Tillage Research*,2006,87(1):9-18.

[15] 陈恩凤,周礼恺,武冠云,微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报,1994,31(4):18-25.

Chen E F,Zhou L K,Wu G Y. Performances of soil micro-aggregates in storing and supplying moisture and nutrients and role of their compositional proportion in judging fertility level[J]. Acta Pedologica Sinica,1994,31(4):18-25.

[16] Elliontt E T.Aggregate structure and carbon, nitrogen, and phosphorus in native and cultivated soils[J].Soil Sci.Soc.Am.J,1986, 50:627-633

[17] Hindes A A,Lowe L E.Distribution of carbon, nitrogen,sulphur and phosphorus in particle-size separates from Gleysolic soils[J].Can.J.Soil Sci., 1980, 60:783~-86

[18] 于博.松辽平原玉米带高产土壤结构性对冻结的相应及机理研究[D].长春：吉林农业大学,2012.

Yu B. Research of the mechanism and response of high yield farmland soil structure characteristics to freeze in corn belt of the Songliao plain[D].Changchun: Jilin Agriculture University,2012.

[19] 马永良，师宏奎，张书奎，吕润海.玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J].中国农业大学学报, 2003, 8(s1): 42-46.

Ma Y L,Shi H K,Zhang S K, Lü R H. Whole maize straw addition: the changes of soil physical and chemical properties and the effect on winter wheat[J]. Journal of China Agricultural University, 2003,8(s1): 42-46..

[20] 张鹏，贾志宽，王维,等. 秸秆还田对宁南半干旱地区土壤团聚体特征的影响[J].中国农业科学,2012,45(8):1513-1520.

Zhang P,Jia Z K,Wang W,et al. Effects of straw returning on characteristics of soil aggregates in semi-arid areas in southern Ningxia of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012,45(8):1513-1520.

[21] 杨长明,欧阳竹,杨林章,等. 农业土地利用方式对华北平原土壤有机碳组分和团聚体稳定性的影响[J]. 生态学报, 2006,26(12): 4148-4155.

Yang C M,Ou Y Z,Yang L Z,*et al*. Organic carbon fractions and aggregate stability in an aquatic soil as influenced by agricultural land uses in the Northern China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2006, 26(12) :4148-4155.

[22] Le Bissonnais Y.Aggregate stability and assessment of soil crustability and erodibility I.Theory and methodology[J].European Journal of Soil Science,1996, 47:425-437.